

触觉运动：用力反馈改善虚拟世界中自我运动的感觉

Nizar Ouarti*

皮埃尔与玛丽-居里大学（巴黎第六大学）/国家科学研究中心

阿纳托尔-勒库耶

(Anatole

Lécuyer†

INRIA

Alain Berthoz‡

法兰西学院

摘要

触觉反馈通常被用来提供一种与虚拟或遥远的物体相互接触的感觉。这些反馈提供了一个访问这些物体在特定环境中的物理属性或约束的机会。在本研究中，我们想知道手部的触觉反馈是否能在虚拟世界中提供一种增强的全身自我运动的感觉。我们设计了两个实验，受试者在视觉上沉浸在一个移动的虚拟环境中，同时暴露在与虚拟摄像机运动相一致的手上的力反馈刺激下。在第一个实验中，运动是在一条直线上，结合只作用于Z轴（纵向）的力反馈，其振幅与虚拟摄像机的加速度成正比。我们表明，与单独的视觉反馈相比，视觉-触觉刺激产生了更高的自我运动感觉。在第二个实验中，我们用一个更复杂的虚拟摄像机轨迹来测试我们的方法，诱导虚拟摄像机的加速度矢量在每个三维轴上拥有分量。基于摄像机的速度和加速度矢量之间的定向差异，我们表明，提供自我运动的最重要感觉的力反馈具有相同的三维方向，并且与虚拟摄像机的加速度成比例关系。这些结果突出了视觉和触觉线索相互作用的方式来提供自我运动的感觉。综上所述，我们的结果表明了力反馈设备在VR中的新应用，以增强自我运动的感觉。

关键词自我运动，触觉反馈，视觉，多模式。

索引条款：H.5.1 [信息界面和展示]：多媒体信息系统--[人工、增强和虚拟现实]；H.5.2 [信息界面和演示]：用户界面--[触觉输入/输出]；H.1.2 [信息管理系统]：用户/机器系统--[人的因素，人的信息处理设计，实验，人的因素，性能]。

1 简介

虚拟现实技术的目标是高度的空间存在。当虚拟场景处于位移状态时，意味着用户的视点应该是移动的，有时向用户提供相应的惯性线索和/或自我运动的感觉是至关重要的。在这项工作中，我们介绍了一种基于视觉-触觉刺激的方法，该方法改善了自我运动的感觉，与其他技术相比有许多好处。该技术的独创性在于使用触觉力反馈。力量被施加在用户的手上，与视觉感知的运动同步和一致。

*e-mail: ouarti@isir.upmc.fr

†e-mail: alecuyer@inria.fr

‡e-mail: alain.berthoz@college-de-france.fr

自我运动的感觉是一种多模式的感知。这意味着许多感觉通道被结合起来，从而对自我运动产生了独特的感觉[19]。这些感觉通道可以是视觉[22, 2, 29]、触觉[32, 33]、本体感觉[17]、前庭[2]甚至是听觉[18]。根据主要针对的生理基质，这里提出了自我运动线索的分类法，分为四个主要类别：视觉、前庭、触觉和本体感觉的线索。

让人们沉浸在虚拟世界中最常见的方式是单独使用视觉线索。例如，在虚拟现实系统中，观看一个大屏幕或佩戴一个头戴式显示器，覆盖视野的最重要部分，是经典的做法。这种技术可以诱发空间存在，其组成部分之一可以是视线。视觉是一种众所周知的自我运动的幻觉。大多数人至少有一次在火车上经历过视觉诱导的自我运动的错觉，这是由另一列火车的视线流引起的，从窗口观察，它开始了。在这种情况下，人们会有一种感觉，即在与视线流相反的方向移动，尽管他们是稳定的。视觉可以是环形的（即由旋转的视线流产生）或线性的（由线性视线流产生）[2, 23, 12, 29]。然而，视觉诱导的自我运动是有限的，因为视觉很适合检测速度信息，而不是加速度[23]。这意味着一些其他的线索可以用来增强自我运动的感觉，从而增强空间存在感。在这项研究中，我们提出了一种使用视觉和触觉线索来诱导自我运动的幻觉的方法。

2 相关工作

在虚拟环境中提供自我运动线索的一个解决方案是前庭刺激[9]。我们可以引用三种主要的刺激类型：六脚架、基于轨道的设备和电刺激。STEW-艺术平台（也称为六足动物[26, 6]）及其变种被广泛用于飞行或驾驶模拟器。这种技术的主要原理是用六个液压缸（六脚架）在六个自由度上移动平台（三个旋转和三个平移）。然而，经典的六爪鱼在工作空间方面是非常有限的。出于这个原因，发明了带轨道的六足动物。轨道上的平台提供了更大范围的线耳加速度的可能性。为汽车工业开发的典型例子是雷诺开发的终极平台和丰田驾驶模拟器。电刺激被用来直接刺激前庭系统[14]。其原理是在内耳中发送电流，刺激一些前庭神经元以提供运动的感觉[1]。

触觉系统也可以提供惯性线索，例如用震动触觉执行器。目前运动模拟器中使用的振动触觉激励器的特点是频率范围窄[30]或与发动机的声音有关[25]。然而，最近的一项研究表明，当频率内容变化时，振动触觉刺激可以改善自我运动的感觉（[20, 8]）。

最后，本体感觉的线索也可以被牵扯进来。在此，我们将本体感觉定义为对肢体运动和肢体位置的感知，也定义为对施

加在肢体上的外力的感知。参与本体感觉的感觉感受器

主要是肌肉主轴和关节感受器[15, 31]。

虽然,有人说,在跑步机运动过程中,很少有任何错觉,以为自己真的在向前移动[7],但可以引用像在跑步机上行走或在自行车上踩踏的亲感觉线索[11]。因为比如说,在环形跑步机上行走可以相当可靠地诱发环形脉动[3]。在这里,自我运动的感觉是由肌肉的动作引起的。我们的新技术可以归入这后一类。

迄今为止,所有开发的在虚拟环境中产生自我运动提示的技术都有内在的局限性。第一个限制是关于大多数这些设备的特定工作空间要求的必要性。这个问题发生在轨道、多方向跑步机和六足动物的情况下。这个问题明显限制了个人客户在家中这些技术的机会。此外,个人客户通常无法支付这些技术所固有的高价。这些问题限制了这些技术在实验室和/或大规模公司之外的传播。

我们可以引用的另一个限制是诱导的自我运动感知的时间限制。例如,众所周知,静脉注射是间歇性的,不能在很长的时间窗口内体验。这意味着视觉刺激不能提供长时间的自我运动的感觉。在倾斜装置的情况下,人们可以区分倾斜(重力加速度)和线性位移(惯性加速度),当倾斜装置的角速度超过半圆管的阈值[27, 16]。这意味着,为了产生自我运动的错觉,倾斜方法可以用于长时间的加速,但这种加速必须是渐进的,不能再现加速的快速变化。轨道技术对加速的持续时间有一个限制:因为轨道长度的限制。此外,这些轨道和倾斜的平台也很难控制。必须做复杂的亚阈值运动(在感知的阈值之下)才能保持在平台的工作空间内。此外,人们经常可以注意到,在一个人的身上缺乏方向性。现有的技术。例如,一个简单的单向跑步机是相当有成本效益的,不需要很大的工作空间。然而,它只提供一个方向的刺激。这意味着受试者只能感觉到他在一条直线上移动。这也是目前振动触觉设备的一个限制。电化刺激也有同样的限制。电化刺激不是特定的;它随机地刺激具有不同方向敏感性的神经元群体。没有一个电刺激系统能够给予定向刺激。最后,一个限制涉及到虚拟加速度的大小演变和可以发送的信息之间的关系。我们已经提到了视觉系统的内在限制。这意味着视觉设备不能提供与加速度大小的变化有关的准确信息。振动触觉设备也不能提供与加速度曲线有关的具体信息。通常发送的信息是一点信息:运动(振动)或无运动(无振动)。然而,最近的发展似乎克服了振动触觉刺激的缺点([20, 8])。有了轨道设备,与虚拟加速度的关系是可能的,但由于轨道尺寸的限制,在很小的范围和有限的时间内。

我们可以引用一些相关的工作来探讨一个可比较的理论。在一项心理物理学研究中,Mergner等人[17]表明,只通过旋转躯干就可以诱发头部的幻觉。[17]表明,在黑暗中只通过旋转躯干来诱发头部旋转的错觉是可能的。这可以被认为是一种仅由本体感觉引起的自我运动的错觉。

另一项与飞机上的迷失方向有关的研究表明,触觉线索可以用来控制自我运动的错觉[4]。该

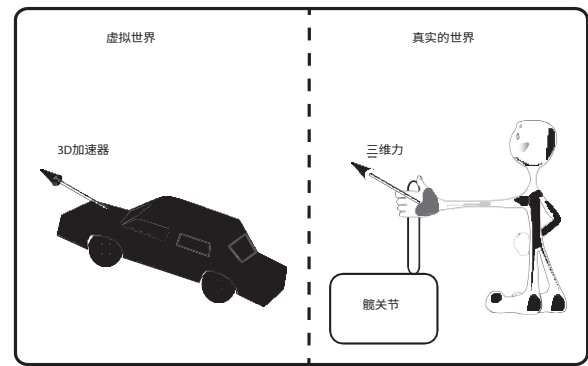


图1: 视觉-触觉方案: 在用户的手上发出一个力, 这个力与视觉感知的加速度矢量成比例, 并处于相同的三维方向。

这项工作的目的是确定对驾驶飞机的受试者的躯干进行振动触觉刺激是否可以限制迷失方向的发生。作者的假设是振动触觉执行器的迷失作用被他们的实验结果所证实。

Rieke以前的一项研究将力反馈用于一个改良的轮椅上,发现视觉诱导的vection明显增加[24]。但在这项研究中,本体感觉和前庭线索的具体作用不能可靠地加以区分。

在这里,我们将重点讨论触觉显示。触觉刺激可以被认为主要是提供本体感觉的线索,在一定程度上也提供触觉线索。以前的一些工作表明,触觉反馈可以加强对自我运动的评价。在以前的研究中,在一个虚拟环境中,一个虚拟的隧道被直观地显示出来。受试者的任务是通过(或不通过)旋转相同角度的触觉设备来确定隧道的转弯角度[13]。研究的结果是,在评估转弯角度时,触觉条件下的倾向性并不明显。

在我们的研究中,我们不评估虚拟运动。我们研究的具体目的是通过视觉-触觉的刺激来增强虚拟世界中的自我运动感觉。

3 概念

我们建议改变触觉设备的使用。触觉反馈主要用于与虚拟环境中的物体互动。触觉设备能够给人以触摸或移动物体的感觉,感受它们的重量或质地。我们概念中的根本变化是,触觉反馈被用来产生用户的身体在三维空间中移动的错觉。我们的方法的关键思想是向用户发送一个与惯性加速度矢量相同方向的力(图1)。在受试者的手上施加这样的力,可以产生一种全身自我运动的感觉,因为它与三维视觉线索是一致的[21]。

图2描述了代表我们概念的实施的模拟管道。一个物理引擎决定了虚拟的加速度。箱体视觉渲染在这里被定义为与触觉力反馈平行产生的视觉信息。三维力被计算出来并与三维视觉场景同步发送。这意味着视觉场景是以与三维力反馈成比例的三维加速度在同一三维方向上移动。

4 实验1: 力反馈可以增加自我运动的幻觉吗?

这第一个实验可以被认为是我们新方法的概念验证。我们想测试一下,与视觉刺激同步的触觉反馈是否能提高自我运动的能力。

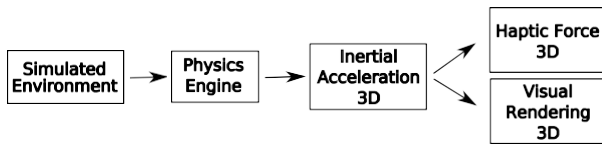


图2：仿真管道。仿真环境与所设计的虚拟世界和车辆的特性相对应。物理引擎从虚拟世界和初始状态中推导出车辆的运动动态，特别是惯性加速度。S_i视觉渲染T对应的是三维视觉场景的产生。S_i Haptic forceT对应于由力反馈界面产生的三维力。

感觉。为此，我们设计了一个实验，在视觉显示的运动中，触觉反馈可以存在或不存在，目的是观察其具体效果。在这个实验中，我们收集了一些通常的标记：开始的时间、幻觉的持续时间、幻觉发生的频率[23, 12, 22, 29]。这些答案的调制可以量化自我运动知觉的变化。

4.1 参与者

9名参与者参加了本实验。他们是6名男性和3名女性，年龄在22至56岁之间。所有参与者都有正常或矫正的视力。

4.2 刺激物和仪器

在本实验中，虚拟运动是一个积极的加速步骤，在3秒后开始，在试验中结束。每个试验的持续时间为25秒，以避免对刺激的视觉适应[10]和可能的后效应[28]。

触觉刺激的方向是在1个轴上，在受试者的参考框架中是纵向的。

视觉场景包括一个用OpenGL设计的三维纹理的圆柱形隧道。受试者坐在离屏幕1.30米处，屏幕的尺寸为垂直1米80，水平2米40。视角为垂直方向108度，水平方向123度。为了获得更真实的空间存在，在屏幕和椅子的边界之间拉紧了黑色窗帘。

受试者被绑在肩膀和腹部的椅子上，以避免在触觉刺激期间受到前庭刺激（图3）。事实上，前庭刺激对线性脉动的影响是众所周知的，在Pavard和Berthoz（1977）[23]中已有描述。这个程序可以测试触觉线索对自我运动的具体影响。受试者用两只手抓住一个6DOF触觉装置（Virtuose, Haption），如图所示。

3.我们要求受试者在整个试验过程中，将其主导手的拇指放在触觉设备的按钮上。这个过程可以确保被试在自我运动的幻觉开始（或消失）的时候准确地按下（或放开）按钮。受试者还被要求将触觉装置保持在同一位置，即抵制力反馈。

4.3 程序和任务

受试者被要求在他们感到有运动的幻觉时按下按钮，不是当屏幕上的图像移动时，也不是当触觉设备移动时，而是一种运动的幻觉，与一个人在火车上看到另一辆火车启动时的幻觉相当。他们还被要求按下按钮，只要感觉持续，就一直按下去，如果感觉消失就停止，如果感觉重新开始，也要再次按回按钮。之后

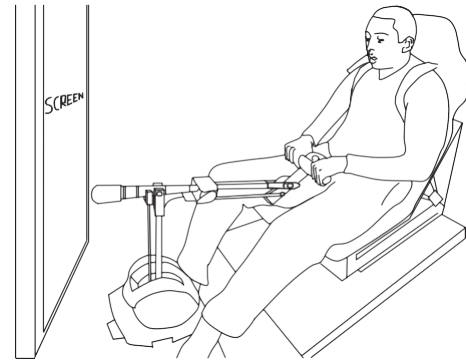


图3：实验装置：受试者抓着6DOF触觉装置。受试者在试验过程中必须把他们的主导手的拇指放在按钮上。他们以对称的方式用两只手抓住触觉装置。受试者被绑在椅子上，以避免躯干和头部移动。受试者在一个房间里，面对一个大屏幕，周围有窗帘，他们在视觉上沉浸其中。

在每一对试验中，受试者必须判断哪一个试验给人的自我运动感觉更强烈。

4.4 设计

使用了三种不同的条件：纯触觉（H）条件，提供动态的触觉反馈，但有一个空的视流场；纯视觉（V）条件，有一个非空的视流场和一个静态的力反馈臂；以及一致的多模式条件，运动线索来自触觉反馈和视流场（VH）。

这三种不同的条件是按对呈现的。这些条件的组合给出了6个不同的配对。这6对条件被随机呈现，每对4次。有24对试验，总共有48个试验。

4.5 结果

为了观察不同条件下触觉反馈的效果，我们决定研究通常的动作标记[23] [12] [22] [29]：动作的开始、持续时间和出现的频率。我们还要求受试者通过一对试验来判断运动的感觉。对于这些数字，在每个盒子上，中心标记是中位数，盒子的边缘是第25和第75个百分点数，晶须延伸到不被认为是离群的最极端的数据点，离群点被单独绘制出来。

4.5.1 发生的频率

自我运动的错觉出现的频率对于比较不同线索给人以运动感觉的各自力量是很重要的。它与感觉到幻觉的概率有关。所有受试者在视觉-触觉条件（VH）下至少有一次感觉到自我运动的感觉。九名受试者中的八名受试者在仅有视觉的条件下至少有一次感觉到自我运动的感觉，即类似静脉的条件（V）。九名受试者中，有三名受试者在纯触觉条件（H）下至少有一次感觉到了自我运动的感觉。

我们比较了视觉-触觉条件和其他条件之间的发生率分布（见图4）。我们使用Wilcoxon签名等级非参数检验，发现当VH条件与H（ $p=0.003$ ）和V（ $p=0.039$ ）条件相比，发生率明显不同。

这些结果意味着，当视觉和触觉反馈在同一时间连贯出现时，受试者更经常地感到错觉。我们在纯视觉条件下的结果也可与以下情况相比较

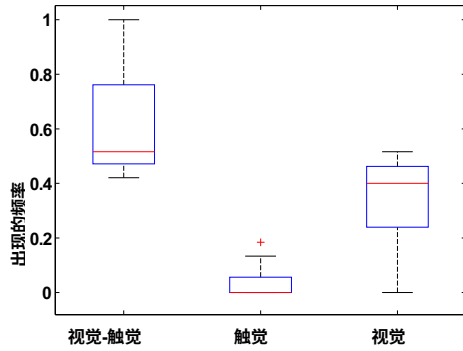


图4：在三种情况下发生自我运动错觉的频率：视觉-触觉，纯触觉，纯视觉。在Visuo-Haptic条件下出现的频率比其他条件下出现的频率要高。

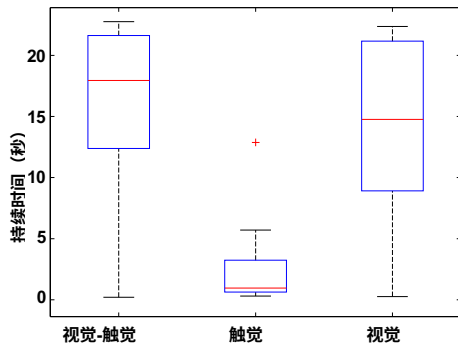


图5：三种条件下的自我运动错觉持续时间：Visuo-Haptic, Haptic-only, Visual-only。在Visuo-Haptic条件下的持续时间明显长于其他条件下的持续时间。

与以往关于线性矢量的研究。

此外，9名受试者中，有3人在仅有触觉的条件下有移动的感觉。这个令人惊讶的结果表明，仅仅通过触觉反馈就可以在一些参与者中诱发运动的错觉。

4.5.2 时间

幻觉的持续时间也是一个重要的标记。自我运动的错觉持续时间被发现明显增加

在视觉-触觉条件下，与仅有视觉（Mann-Whitney, $p = 0.013$ ）和仅有触觉（Mann-Whitney, $p = 8.4 \cdot 10^{-7}$ ）的条件相比，视觉-触觉条件的分布情况如下。其分布情况见图5。

4.5.3 发病

启动可以定义为从刺激开始到受试者感知到自我运动的错觉的时间。图6显示了每个条件下的起始点的分布。可以看出，在纯触觉（H）条件下，启动的中位数较低（1.30秒），而在视觉-触觉（VH）条件下（1.79秒），启动的中位数较高，发生在纯视觉（V）的条件下（3.50秒）。

发病的分布并不遵循正常规律。因此，我们计算了一个非参数方差分析，以检验中位数的平等性。

在不同条件下的中位数。我们得到的P值为 $2.2 \cdot 10^{-4}$ ($\chi^2(2, 16.83)$)，这意味着不同条件下的中位数有显著差异。为了确定哪些中位数与其他中位数有显著差异，我们计算了三种不同的曼-惠特尼检验。对于VH条件和H条件之间的比较，我们发现P值为0.041，VH和V的p值为 $2.7 \cdot 10^{-3}$ ，H和V之间的p值为 $3.5 \cdot 10^{-4}$ 。这表明，三个分布的每个中位数显著不同于其他条件。可以这样说，在三种条件下的起始点是明显不同的，H条件下的起始点较低，其次是VH条件下的起始点，最后是V条件下的起始点较高。因此，这些结果表明，当与视觉信息结合时，触觉反馈可以减少受试者感受到运动错觉所需的起始时间。这可以解释为与视觉传感器相比，肌肉纺锤体的反应更快。这也可能是观察到的情况是，起始点的变异性是按相同的顺序排列的比中位数值要高。这意味着，开机率较低的条件也是比较集中的，反之，开机率较高的条件则比较分散。

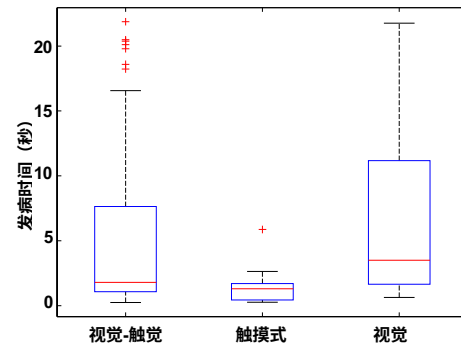


图6：三种条件下的发病率：Visuo-Haptic, Haptic-only和Visual-only。纯触觉条件下的起始时间最低（集中在1.30秒左右），之后是视觉-触觉条件（集中在1.79秒左右），最后是纯视觉条件（更加分散，大量的起始时间在3.5秒左右）。

4.5.4 主观问卷调查

受试者必须在一对试验后回答，在这对试验的第二个试验中，运动感觉是否比这对试验中的第一个优越。这个被迫选择的问题的结果在图7中得到了总结。受试者明显判断，视觉-触觉条件是他们感受到最重要的运动感觉的条件，其次是纯视觉条件，最后是纯触觉条件。

4.6 暂定结论

触觉信息对发生的频率、持续时间、幻觉的发生有很大的影响，也对自我运动感觉的主观强度有影响。鉴于所有这些结果，我们可以得出结论，触觉反馈可以改变自我运动的感觉并增强它。看来，视觉-触觉条件会导致一个短的开始（可能是由于触觉信息）和一个长的持续时间（可能是由于视觉信息）。

5 实验2：在全3D背景下的概念泛化

在第一个实验中，模拟的运动是在一条直线上。我们表明，视觉刺激与施加在一个轴上的力的反馈相结合，其力的振幅与

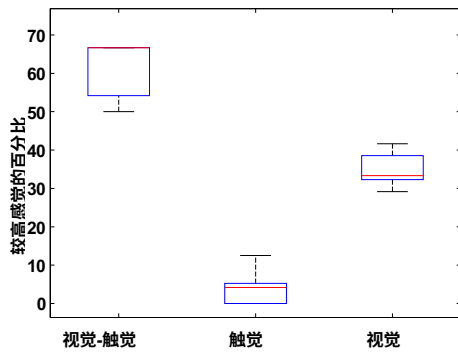


图7: 主观答案的百分比, 其中一个条件被认为提供了更大的自我运动的感觉。与其他条件相比, Visuo-Haptic条件被认为提供了更大的自我运动的感觉。

与单独的视觉刺激相比, 虚拟摄像机的加速度提供了一个更重要的自我运动的感觉。在第二个实验中, 我们的目的是推广这一概念。一个更复杂的轨迹被呈现给受试者, 诱发了一个具有三维成分的加速度矢量。我们想知道, 与其他力反馈模式相比, 具有比例大小并与虚拟摄像机的加速度共享一个共同的三维方向的三维力反馈是否提供了最重要的自我运动的感觉。

为了回答这个问题, 我们设计了5种触觉模式 (一种没有触觉力量的模式)。并要求受试者在不同的试验对中选择能给人最重要的自我运动感觉的模式。最后, 受试者必须根据不同的主观标准 (自我运动、空间存在和真实感) 来评估不同模式所提供的感觉。

5.1 参与者

八名天真无邪的参与者参加了本实验: 4名女性和4名男性, 年龄在21至42岁之间, 平均值为27.88岁。所有参与者都有正常或矫正的视力。

5.2 刺激物和仪器

仪器和受试者的位置与第一个实验中的类似。这个实验的特点是, 我们模拟了一个三维环境 (三维弯曲的隧道), 我们使用物理引擎来推导模拟车辆的加速度。受试者暴露在一个基于物理的加速度下, 取决于隧道的形状。这个加速度是基于模拟车辆, 它受到重力、轨道反应、与轨道和空气的摩擦。运动在3秒的倒计时后开始, 并随着试验的进行而结束。每个试验的持续时间被限制在25秒内。

视觉场景由一个三维纹理的扭曲隧道组成, 是用OpenGL设计的。这个隧道是用控制点生成的, 这些控制点通过插值确定了立方样条。由于隧道的几何形状和车辆与环境之间的现实物理交互作用 (重力、摩擦力等), 车辆开始时的加速度不是空的, 足以到达复杂隧道的尽头。

5.3 程序和任务

被试的任务是根据自我运动的感觉来比较两个连续的试验。我们称其为配对任务。

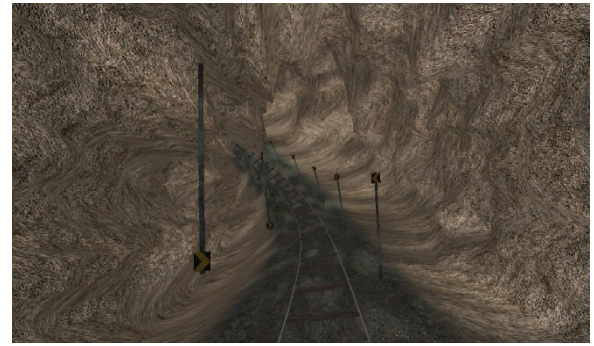


图8: 实验2中使用的三维隧道。

在每对试验结束时, 受试者必须按一个按钮来继续: 当他在第一次试验中感受到较强的自我运动感觉时按下按钮1, 否则按按钮2 (即强迫选择)。在80次试验结束时, 我们再次呈现了五个不同的触觉符号。

然后要求受试者对这五种触觉模式进行标记, 根据3个不同的标准, 在1到7之间给出一个等级。我们称其为标记任务。第一个标准是自我运动的感觉: 相对于环境移动的幻觉。第二个标准是空间存在感: 在虚拟场景中的感觉。第三个标准是真实性: 感觉到有一个真实的互动。

5.4 设计

鉴于在环境中计算的模拟车辆的加速度, 有两种信息被计算出来: 视觉和触觉反馈。虚拟摄像机被安装在车辆上。光学流场与车辆的运动完全对应。在本实验中, 光学流场在所有条件下都是相同的。视觉速度被定义为可以通过视觉线索感知的速度。对于触觉反馈, 有5种条件对应于5种三维力的计算: 触觉力与三维虚拟加速度成正比且方向相同 (HAS), 触觉力与三维视觉加速度成正比且方向相反 (HAO), 触觉力与三维视觉速度成正比且方向相同 (HVS), 触觉力与三维视觉速度成正比且方向相反 (HVO), 最后无触觉反馈 (NO)。这五种不同的条件是成对出现的。这些条件的组合给出了10个不同的配对。这10对试验被随机地呈现, 每对试验四次。有40对试验, 共80个试验。这些配对是随机洗牌的。

5.5 结果

为了进一步了解什么样的触觉信息对产生自我运动的感觉是重要的, 我们要求受试者通过一对试验来判断运动的感觉。它们是4种不同的触觉条件, 以及一种没有触觉反馈的条件。在每个试验中, 受试者都在屏幕前, 抓着触觉设备。在80次试验之后, 受试者必须根据不同的主观标准对四种不同的触觉反馈进行标记: 自我运动的感觉、空间存在感和真实感。

我们发现触觉反馈对自我运动的感知有显著影响。成对任务的统计检验(kruskall wallis $p = 2.6 \cdot 10^{-6}$)表明, 有一个显著的条件之间的差异 (图9)。为了说明这些差异的特点, 我们使用了事后检验。这个测试显示了一个差异与NO条件相比, 所有条件之间的差异 (Mann-Whitney, $p = 1.5 \cdot 10^{-4}, p = 3.1 \cdot 10^{-4}, p = 9.6 \cdot 10^{-4}$, 除了

条件HVS与（NO）相比（ $p=0.053$ ），非常接近极限，表明与加速度成比例的触觉反馈对自我运动感知有明显的影响，但对于与速度成比例的触觉反馈，其影响似乎较弱。这个统计测试还显示，HAS和HAO之间的差异很明显，分别与HVS和HVO（Mann-Whitney， $p=1.5 \cdot 10^{-4}$ ， $p=3.1 \cdot 10^{-4}$ 、 $p=1.5 \cdot 10^{-4}$ ， $p=7.8 \cdot 10^{-4}$ ）意味着触觉反馈与与速度成正比的触觉反馈相比，与加速度成正比的触觉反馈提供了更重要的运动感觉。此外，统计测试显示，对于与加速度成比例的触觉反馈，受试者的首选刺激方向是随机分布的（Mann-Whitney， $p=0.24$ ）。但对于与速度成比例的触觉反馈，相反的方向提供了更重要的运动感觉（Mann-Whitney， $p=0.030$ ）。

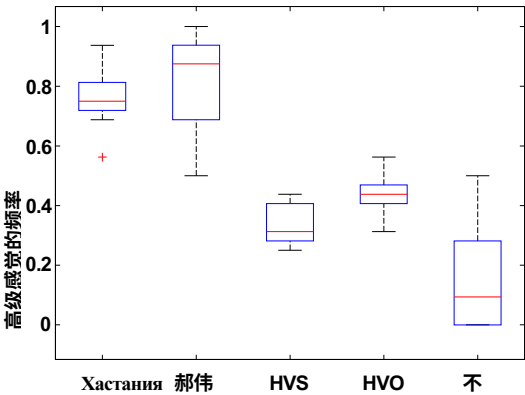


图9：一个条件被认为比其他条件给人更强的自我运动感觉的次数百分比。条件HAS：触觉反馈与视觉加速度成比例，方向相同；条件HAO：触觉反馈与视觉加速度成比例，方向相反；条件HVS：触觉反馈与视觉速度成比例，方向相同；条件HVO：触觉反馈与视觉速度成比例，方向相反；条件NO：没有触觉反馈。

标记任务的结果与之前配对任务中的重新赞助是一致的。事实上，无论标准是什么，加速度曲线总是排在第一位：自我运动、空间存在或现实主义（图10、11和12）。我们进行了一个统计测试，以分析这些条件是否对自我运动、空间存在和现实感有影响（图10、11和12）。我们在比较所有的条件时，发现自我运动的标准有显著的差异（Kruskall Wallis $P=4.1 \cdot 10^{-6}$ ）。对于空间存在标准的差异也被发现是显著的（Kruskall Wallis $p=4.1 \cdot 10^{-4}$ ），对于现实主义标准也是如此（Kruskall Wallis $p=1.0 \cdot 10^{-3}$ ）。这些结果表明，触觉反馈对自我运动的感觉、空间存在和虚拟世界的真实感有影响。

为了进一步了解触觉反馈产生的那种效果，我们计算了一个事后测试。表1总结了自我运动、空间存在和真实性的结果。可以看出，在自我运动标准方面，除了HAS和HAO以及HVS和HVO之间的比较，所有条件之间都有明显的差异，这意味着受试者随机地喜欢这种方式。

对于空间存在标准，有一个显著的差异

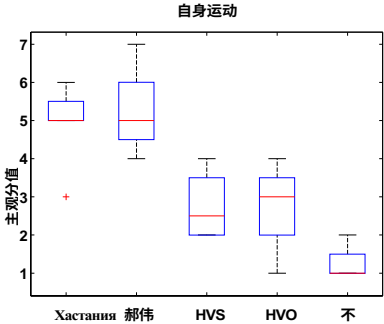


图10：主观的偏好：对各种标准的评分：自我运动的感觉、空间存在感和5种情况下的真实性。条件HAS：触觉反馈与视觉加速度成比例，方向相同；条件HAO：触觉反馈与视觉加速度成比例，方向相反；条件HVS：触觉反馈与视觉速度成比例，方向相同；条件HVO：触觉反馈与视觉速度成比例，方向相反；条件NO：没有触觉反馈。

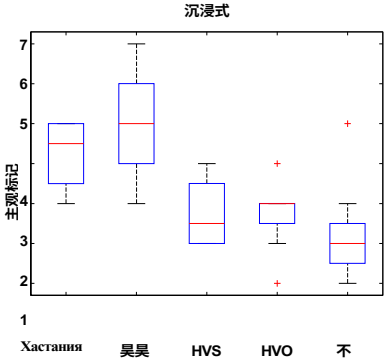


图11：主观偏好：在5种条件下（HAS、HAO、HVS、HVO和NO），对标准：空间存在的评分。

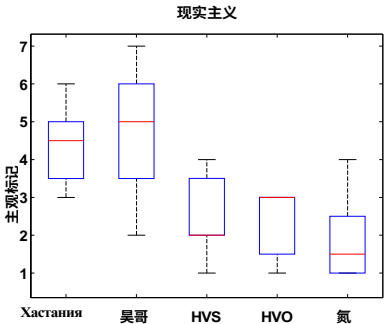


图12：主观偏好：在5种条件下（HAS、HAO、HVS、HVO和NO），对标准的评分：真实--主义。

表1：
运动员在 "自我运动 "这一标准上的分数比较如下
所有的条件 (Mann-Whitney p-value.)。

	Хаст	昊哥	HVS	HVO	没有
Хаста	-	0.2606	0.0132	0.0112	0.0082
ААА	-	-	0.0037	0.0030	0.0019
HVS	-	-	-	0.8260	0.2420
HVO	-	-	-	-	0.1546
没	-	-	-	-	-

表2:
在 "空间存在" 这一标准上的分数比较
所有的条件 (Mann-Whitney p-value.)。

	Хаста	昊哥	HVS	HVO	没有
Хаста	-	0.2606	0.0132	0.0112	0.0082
AAA	-	-	0.0037	0.0030	0.0019
HVS	-	-	-	0.8260	0.2420
HVO	-	-	-	-	0.1546
没有	-	-	-	-	-

表3:
准则 "现实主义" 的分数在以下方面的比较
所有的条件 (Mann-Whitney p-value.)。

	Хаста	昊哥	HVS	HVO	没有
Хаста	-	0.4406	0.0087	0.0033	0.0022
昊哥	-	-	0.0172	0.0315	0.0042
HVS	-	-	-	1.0000	0.2514
HVO	-	-	-	-	0.2821
没有	-	-	-	-	-

除了HAO和HVS之间的比较（结果与自我运动标准相当），所有条件之间都有明显的差异，但HVS和HVO两个条件与NO条件之间也没有明显的差异，这意味着，对于这个标准，与速度成比例的触觉反馈与无触觉反馈条件相比似乎没有增加价值。同样的结果也出现在真实性标准上：除了方向相反的条件外，所有条件之间的比较都有显著差异。同样对于这个标准，与速度成比例的触觉反馈与无触觉反馈相比，似乎没有增加价值。

5.6 暂定结论

在复杂的三维虚拟运动中，基于加速度的触觉反馈与视觉反馈相结合，对自我运动的感知有更重要的影响。当这种触觉反馈与速度有关时，可以注意到一个小的影响，并且表明，与与加速度有关的触觉反馈相比，自我运动的感觉较低，但对于自我运动的感觉，与速度有关的触觉反馈比没有触觉反馈的情况有更重要的影响。对于3D场景中的真实感或空间存在等标准，与速度有关的触觉反馈可以被认为是没有影响的（即与无触觉反馈条件相比）。最后，与视觉运动方向相反和相同的触觉反馈在答案的分布上被认为是等同的。事实上，我们可以看到50%的受试者喜欢一个方向，50%的受试者喜欢另一个方向。

6 讨论

我们提出了一种视觉-触觉效果，诱发了一种自我运动的错觉。我们表明，与单独的视觉流相比，视觉流与手上的力反馈的结合提供了一种更重要的全身自我运动的感觉。更具体地说，我们表明，当三维力反馈的大小是成比例的，并且与虚拟摄像机的加速度有一个共同的方向时，自我运动的感觉会增强。

我们在第一个实验中表明，触觉反馈诱导增强了幻觉的发生频率和持续时间。触觉反馈也减少了起始时间（诱发错觉所需的时间），并提供了一个更重要的自我运动的主观感觉。这种视觉-触觉

错觉利用了视觉系统（错觉的持续时间）和触觉系统（短的开始时间）的内在属性。在第二个实验中，与视觉加速度成比例的触觉反馈与与速度有关的触觉反馈相比，似乎能引起更重要的自我运动的感觉。这一结果在不同的标准（自我运动、空间存在和真实感）下得到了证实。此外，与速度成比例的触觉反馈对自我运动的影响很小，考虑到现实性和空间存在的标准，似乎有一个与没有触觉反馈相当的效果。

我们的具体仪器值得讨论。首先，我们把使用者的肩膀绑在一起，以确保效果不是前庭性的。事实上，运动并没有传递到身体和头部，而是在手臂局部。这使得我们可以声称我们没有复制一些较早的结果，因为前庭输入对自我运动感觉的影响是众所周知的[2, 23]。相反，这种观察有一些实际的好处。最重要的一点是可以只通过刺激手和手臂来产生幻觉。这很重要，因为它意味着用相对较小的电子引擎就可以产生幻觉。而且它为在家里进行个别应用提供了可能性。同样，这也确保了该技术可以在小范围内使用，并具有相对的安全性。最后，这种效果与整个姿势无关，人们不应该站着来感知这种效果。

我们的技术的主要优点之一是能够在很长一段时间内产生加速度的感觉。从生态学的角度来看，感知加速度对包括人类在内的每一种动物都非常重要。事实上，在日常生活中，平衡必须得到保证。为此，对于中枢神经系统来说，能够估计加速度是非常重要的，例如与速度相比。这就是为什么人类对加速度非常敏感的原因。为了生产更多的沉浸式设备，关键是要能够提供加速的感觉。其他一些设备成功地提供了这种感觉，如六足动物或轨道，但它们的加速时间是有限的。在我们的案例中，理论上我们可以在很长的时间内提供加速的感觉，并且有一个重要的振幅。这是我们技术的主要兴趣所在。

另一个兴趣是这一技术所带来的全三维刺激。在我们的效果下，刺激的方向是没有限制的。从理论上讲，用我们的方法，在三维空间的每个方向上给予自我运动的感觉是没有限制的，例如在Y轴（向上的方向）。在通常的模拟器技术中，这是不可能的。

我们的效果的解释可以通过物理上一致的多模态过程来理解。自我运动的感知尤其是多模态的。在这项研究中，我们使用了两种模式，即本体感知和视觉，而不是只使用视觉模式。其结果是在大脑中诱导出一种更真实的自我运动感觉。我们还设计了一个力反馈曲线，它与观察者感知到的光学流在物理上是一致的。事实上，如果我们把观察者看作是与虚拟摄像机共处一室，那么作用在该摄像机上的力将在同一方向上，其振幅与摄像机的加速度成比例。这是动力学的基本规律所证明的。但是，根据与摄像机的移动所代表的车辆的 "物理互动"，力可能是在一个方向或相反的地方。我们实验的一个重要结果是，受试者发现有一个与加速度成正比的力反馈更为现实。但三维力矢量的方向问题必须加以讨论。事实上，一些受试者发现，当力的方向与加速度成正比时，更加真实。

在加速的方向上,还有一些是在相反的方向上。实际上,身处车辆中的乘客可以感知两种力。基于他与车辆的互动,乘客可以感觉到基于惯性或拉力的力。受试者可以感觉到他与车辆一起移动(被车辆拉动),或者他在惯性作用下相对于车辆移动。举个例子,当被试者站在火车上,不可能用手抓东西。在火车加速后,站立的主体面临着一个虚拟的力(惯性),将他"推"向与加速方向相反的方向。在另一种情况下,一个使用滑水运动的人被拉动,感知到的力与车辆加速的方向相同。在这两种情况下,自我运动的感觉很重要,即使物理表现略有不同。在实验中,我们并没有试图通过建议被试在虚拟环境中的互动方式来影响他们。因此,这两种互动模式是可能的。有趣的是,鉴于这种互动模式的等效性,大约有50%的人对一个方向的力的刺激更敏感,而另外50%的人则对另一个方向的力的刺激更敏感。未来的工作可以集中在技术方面,以建议一个或另一个互动模型。

7 总结

我们提出了一种新的视觉-触觉效果,只有通过视觉刺激相一致的手的刺激才能诱发重要的自我运动感觉。我们表明,触觉力的模式是很重要的,而且必须是物理上的共同存在才能产生更大的影响。我们设计了具体的实验,突出了视觉和触觉线索相互作用的方式,以提供自我运动的感觉。我们在此讨论了这种效果的众多优点和可能的技术应用。例如,一个可能的应用是驾驶模拟器。另一种类型的应用是增强视听体验[5]。我们相信,这项技术可以对娱乐业和任何其他意味着在虚拟世界中运动和导航的领域产生强大的影响。

参考文献

- [1] S.G. T. Balter, M. H. Castelijns, R. J. Stokroos, and H. Kingma.前庭分裂症患者的电流诱导的身体摇摆:刺激中央前庭系统的证据。 *Acta Otolaryngol*, 124(9):1015-1021, Nov 2004.
- [2] A.Berthoz, B. Pavard, and L. R. Young.周边视觉诱导的线性水平自我运动的知觉(线性运动)的特征和视觉-视听的相互作用。 *Exp Brain Res*, 23(5):471-489, Nov 1975.
- [3] W.Bles. *Attention and performance IX*, chapter Stepping around: circular vection and Coriolis effects., pages 47-61. Erlbaum, Hillsdale, NJ, 1981.
- [4] J.E. Bos, J. van Erp, E. L. Groen, and H.-J. van Veen. 前庭-触觉对运动知觉和眼球运动的相互作用。 *J Vestib Res*, 15(3):149-160, 2005.
- [5] F.Danieau, A. Lecuyer, P. Guillotel, J. Fleureau, N. Mollet, and M.Christie.用触觉反馈增强视听体验:关于hav的调查 *IEEE Transactions on Haptics*, 2012.
- [6] B.Dasgupta and T. Mruthyunjaya.斯特瓦特平台机械手:一个回顾。 *机制和机器理论*, 35 (1) : 15-40, 2000.
- [7] F.H. Durgin, A. Pelah, L. F. Fox, J. Lewis, R. Kane, and K. A. Waller.运动再校准过程中的自我运动感知:不只是满足眼睛。 *J Exp Psychol Hum Percept Perform*, 31(3):398-419, Jun 2005.
- [8] I.Farkhatdinov, N. Ouarti, and V. Hayward.脚部的振动触觉输入可以调节矢量。见《2013年IEEE世界触觉会议论文集》(*Proceedings of the IEEE World Haptics Conference 2013*)。第677-681页,2013年。
- [9] L.R. Harris, M. Jenkin, and D. C. Zikowitz.线性自我运动感知中的视觉和非视觉线索。 *实验脑研究*, 135: 12-21, 2000年11月。
- [10] M.A. Hietanen, N. A. Crowder, and M. R. Ibbotson.由于运动适应而导致的人类对速度感知的差异性变化。 *J Vis*, 8(11):6.1-610, 2008.
- [11] J. Hollerbach. *虚拟环境技术手册*, 运动界面一章, 第239-254页。2002.
- [12] J. Huang和L. R. Young.在不同的光照和黑暗中,用固定的视野对围绕垂直轴旋转的感觉。 *Exp Brain Res*, 41(2):172-183, 1981.
- [13] A.Lécuyer, M. Vidal, O. Joly, C. Mégard, and A. Berthoz.合适的反馈能改善虚拟现实自我运动的感知吗?芝加哥,2004年。第12届虚拟环境和远程操作系统触觉接口研讨会(Haptics Symposium)。
- [14] T.前田, H.安藤, T.雨宫, N.长谷, M.杉本, 和M.In-amio.摇晃的世界:加尔文前庭刺激作为一种新的感觉界面。In *Proc. of ACM SIGGRAPH 2005 Emerging Technologies*, p.17, L.A., CA., 2005.
- [15] D.I. McCloskey.运动感性。 *Physiol Rev*, 58(4):763-820, Oct 1978.
- [16] D.M. Merfeld.旋转耳石倾斜-翻译再解释(rotrr)假说:一个解释神经前庭航天适应的新假说。 *J Vestib Res*, 13(4-6):309-320, 2003.
- [17] T.Mergner, C. Siebold, G. Schweigart, and W. Becker.人在前庭和颈部刺激时对躯干和头部在空间的水平旋转的感知。 *Exp Brain Res*, 85(2):389-404, 1991.
- [18] C.Muller, P. Schnider, A. Persterer, M. Opitz, M. V. Ne-fjodova, and M. Berger.空间飞行中的应用心理声学。 *Wien.Med.Wochenschr.*, 143:633-635, 1993.
- [19] N.Ouarti and A. Berthoz.使用小波和四元数进行自我运动感知的多模态融合。In *Deuxieme conference fran-caise de Neurosciences Computationnelles, Neurocomp*, 2008.
- [20] N.Ouarti和V. Hayward.脚上的特定振动触觉信号增强了自我运动的体验。在Theo Murphy关于主动触摸感应的会议上,英国皇家学会,2011年。
- [21] N.Ouarti, A. Lecuyer, and A. Berthoz.触觉运动模拟器:在虚拟世界中用力反馈证明运动的感觉。在JVRC(联合虚拟现实会议)上,2010年。
- [22] S.Palmisano.在深度上感知自我运动:立体运动和尺寸变化线索的作用。 *Percept Psychophys*, 58(8):1168-1176, Nov 1996.
- [23] B.Pavard和A. Berthoz.线性加速度改变了移动视觉场景的感知速度。 *Perception*, 6(5):529-540, 1977.
- [24] B.Riecke.简单的用户生成的运动提示可以增强虚拟现实中的自我运动感知(vection)。在ACM虚拟现实软件和技术研讨会上,第104-107页,2006年。
- [25] B.E. Riecke, J. Schulte-Pelkum, F. Caniard, and H. H. Bulthoff.虚拟现实中的精简和优雅的自我运动模拟。In *Proc. IEEE Virtual Reality VR 2005*, pages 131-138.
- [26] D.斯图尔特.一个具有6个自由度的平台。在 *Proc. of the Institution of Mechanical Engineers*, 1965.
- [27] C.W. Stockwell和F. E. Guedry.倾斜时的半规管刺激对随后的视觉垂直感知的影响。 *Acta Otolaryngol*, 70(3):170-175, Sep 1970.
- [28] S.Tanahashi, H. Ujike, R. Kozawa, and K. Ukai.视觉模拟的滚动运动对转向和姿势稳定的影响。 *J Neuro-eng Rehabil*, 4:39, 2007.
- [29] L.C. Trutoiu, B. Mohler, J. Schulte-Pelkum, and H. H. Bulthoff.大屏幕虚拟环境中的环、线和曲线矢量的地板投影。在 *Proc. IEEE虚拟现实会议*上,第115-120页,2008年3月8-12日。
- [30] A.Valjamae, P. Larsson, D. Vastfjall, and M. Kleiner.听觉诱导的自我运动和空间存在的振动触觉增强。 *音频工程学会杂志*, 54:954-963, 2006。
- [31] R.J. van Beers, A. C. Sittig, and J. J. D. van der Gon.人类如何同时结合本体感觉和视觉位置信息。 *Exp Brain Res*, 111(2):253-261, Sep 1996.

[32] J.B. F. van Erp, E. L. Groen, J. E. Bos, and H. A. H. C. van Veen。一个触觉驾驶舱仪器支持在空间迷失期间的自我运动控制。 *Hum Factors*, 48(2):219-228, 2006.

[33] L.R. Young和M. Shelhamer。微重力增强了视觉引起的运动感觉的相对贡献。 *Aviat Space Envi-ron Med*, 61(6):525-530, Jun 1990.